

Trabajo Final de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Calidad del suministro eléctrico

MEMORIA



Autora: Ana de Erausquin Marsal
Director: Luis Sainz Sopera
Codirector: Juan José Mesas García
Convocatoria: Septiembre 2019



Resumen

La calidad del suministro eléctrico es el conjunto de normas que fijan las características que debe tener la onda de tensión en las instalaciones de corriente alterna para un correcto suministro eléctrico a los consumidores.

Estas características atienden a una serie de parámetros que definen la onda de tensión tales como su valor eficaz, frecuencia o forma de onda y se recogen en la Norma UNE-EN-50160.

El trabajo se centrará en el estudio de las características que definen las formas de onda sinusoidales, el análisis de la Norma UNE-EN-50160 y los parámetros fijados por ella para tener una correcta calidad de suministro eléctrico, así como los motivos que pueden perturbar dichos parámetros y las consecuencias que ello comporta.

Además, se ampliará el estudio anterior con ejemplos y simulaciones ilustrativas que permitan entender mejor los conceptos sobre calidad del suministro eléctrico, así como el alcance y consecuencias de una mala calidad de las tensiones en un sistema eléctrico.

Sumario

Resumen	2
Sumario	3
Prefacio	5
1.1. Origen del proyecto	5
1.2. Motivación	5
1.3. Requerimientos previos	6
2. Introducción	7
2.1. Objetivos del proyecto	7
2.2. Alcance del proyecto	7
3. Suministro eléctrico	8
3.1. Introducción	8
3.2. Generación	10
3.3. Transporte	10
3.4. Distribución	11
3.5. Características de tensiones y corrientes sinusoidales	13
3.5.1. Introducción	13
3.5.2. El periodo y la frecuencia	14
3.5.3. Amplitud y Valor eficaz	14
3.5.4. Ángulo de Fase	15
3.6. Ondas de tensión sinusoidales trifásicas	15
4. Norma UNE-EN-50160	18
4.1. Introducción	18
4.2. El periodo y la frecuencia	18
4.3. Amplitud de la tensión suministrada	19
5. Perturbaciones eléctricas	21
5.1. Introducción	21
5.2. Armónicos	21
5.3. Interarmónicos	26
5.4. Reducción o incremento de la tensión	27
5.4.1. Subtensión y Sobre tensión	27
5.4.2. Huecos de tensión	28
5.4.3. Interrupciones	30
5.5. Flicker o parpadeo	31
5.6. Desequilibrios	32
6. Aplicaciones: estudios de las perturbaciones	35

6.1. Armónicos	35
6.2. Reducción o incremento de tensión	36
6.2.1. Huecos de tensión	36
6.2.2. Interrupciones	36
6.3. Flicker	37
6.4. Desequilibrios	38
7. Estudio económico	40
8. Conclusiones	41
9. Agradecimientos	42
10. Bibliografía	43

Prefacio

En este capítulo se va a explicar en primer lugar el origen del proyecto, posteriormente la motivación que ha llevado a su realización y finalmente, los requerimientos previos a la realización del proyecto.

1.1. Origen del proyecto

Históricamente el primer requerimiento que se solicitó al suministro eléctrico fue el de la continuidad del servicio con el objeto de evitar interrupciones de éste que pudiesen afectar a consumidores y procesos productivos. Este es un aspecto casi totalmente superado en los países desarrollados gracias a los avances tecnológicos y el concepto que más preocupa en la actualidad es el de la calidad del suministro eléctrico. Es decir, que el suministro de la energía eléctrica no solo tenga asegurada su continuidad en el tiempo, sino que también llegue a los consumidores con unas características razonables que permitan el correcto funcionamiento de todos los dispositivos eléctricos conectados en las instalaciones.

La calidad del suministro eléctrico es un concepto de creciente importancia en la actualidad debido a la proliferación de dispositivos electrónicos cuyo comportamiento es muy sensible a la calidad de las ondas de tensión que los alimentan. No obstante, es evidente en frecuentes trabajos tanto teóricos como prácticos que dicho concepto no llega a ser correctamente interpretado y entendido existiendo muchas veces una gran confusión con todo lo que rodea los aspectos generales y particulares de la calidad del suministro eléctrico.

La puesta en marcha de la redacción de un escrito que resumiera las especificaciones de la UNE-50160 y su posterior representación fue debido a la observación de que en dicha norma los parámetros no quedaban totalmente explicados para un público más general. Había una necesidad de la explicación de parámetros necesarios para el buen entendimiento de todas las perturbaciones antes de entender las perturbaciones en sí.

1.2. Motivación

La motivación para la realización de este proyecto es la creación de un texto que pueda ser de utilidad para mejor entendimiento de la norma UNE-EN-50160 por parte de un público menos especializado.

Otra de las motivaciones ha sido el poder profundizar en efectos de ciertas perturbaciones en el suministro eléctrico, viendo así una continuación de los estudios de la asignatura de electrotecnia del grado de ingeniería en tecnologías industriales.

1.3. Requerimientos previos

Para poder realizar satisfactoriamente éste trabajo han sido imprescindibles los conceptos adquiridos mayoritariamente en la asignatura de electrotecnia y también, aunque en menor medida de los conceptos de la asignatura de electrónica.

También han sido necesarios conceptos de la asignatura de calidad eléctrica del máster de ingeniería de las energías.

2. Introducción

A continuación, se va a definir los objetivos principales que se desean conseguir con el proyecto. Seguidamente se definirá los límites de actuación del proyecto.

2.1. Objetivos del proyecto

Los objetivos al realizar este proyecto final de grado son fundamentalmente dos:

- Realizar un texto que explique el concepto de calidad del suministro eléctrico, los parámetros y variables que caracterizan dicha calidad de suministro y las perturbaciones que pueden afectarla para un público general. El texto pretende ser una lectura de apoyo a la Norma UNE-EN_50160 para su mayor comprensión.
- El segundo objetivo es utilizar una aplicación previamente realizada en un anterior TFG para estudiar y representar las perturbaciones explicadas con el objeto de fijar y clarificar los conceptos teóricos sobre la calidad del suministro eléctrico y las perturbaciones que pueden afectarla.

Por último, también se ha perseguido el objetivo de ampliar y extender los conocimientos adquiridos durante el grado a unos conceptos que son estudiados a nivel de master y que son de gran importancia hoy en día en las instalaciones eléctricas.

2.2. Alcance del proyecto

El alcance del proyecto parte de los conocimientos básicos de electrotecnia y máquinas eléctricas y se extiende más allá de dichos conocimientos introduciendo conceptos sobre las perturbaciones periódicas y no periódicas en las instalaciones eléctricas tales como los armónicos de tensión y corriente y los huecos de tensión.

El proyecto pretende trabajar sobre la Norma UNE-EN_50160 con el objeto de presentar de forma sencilla y clara los requerimientos de esta en cuanto a la calidad del suministro eléctrico, así como desarrollar una serie de ejemplos a partir de un programa ya existente que permitan entender las ideas expuestas por dicha Norma.

El trabajo desarrollado iría dirigido tanto a estudiantes de Máster que tuviesen que introducirse en estudios sobre calidad del suministro eléctrico como a instaladores que necesitasen mejorar sus conocimientos.

3. Suministro eléctrico

3.1. Introducción

El suministro eléctrico está formado por tres partes diferenciadas, la generación, el transporte y la distribución a los distintos consumidores.

Estas tres partes, que se van a explicar a continuación, se encuentran en diferentes niveles de tensión. Se puede hacer una clasificación de la tensión según su valor en Voltios.

A continuación, se muestra una tabla donde se muestra los distintos valores de tensión y su nombre correspondiente.

Magnitud de la tensión	Nivel de tensión
$\leq 50 \text{ V}$	Muy Baja Tensión
$50 \text{ V} < \text{Tensión} \leq 1000 \text{ V}$	Baja Tensión (B.T.)
$1000 \text{ V} < \text{Tensión} \leq 60 \text{ kV}$	Media Tensión (M.T.)
$60 \text{ kV} < \text{Tensión} \leq 275 \text{ kV}$	Alta Tensión (A.T.)
$275 \text{ kV} < \text{Tensión}$	Muy Alta Tensión

Tabla 1: Valores de Tensión con nombres correspondientes

La siguiente figura muestra las diferentes etapas del suministro eléctrico con su correspondiente nivel de tensión.

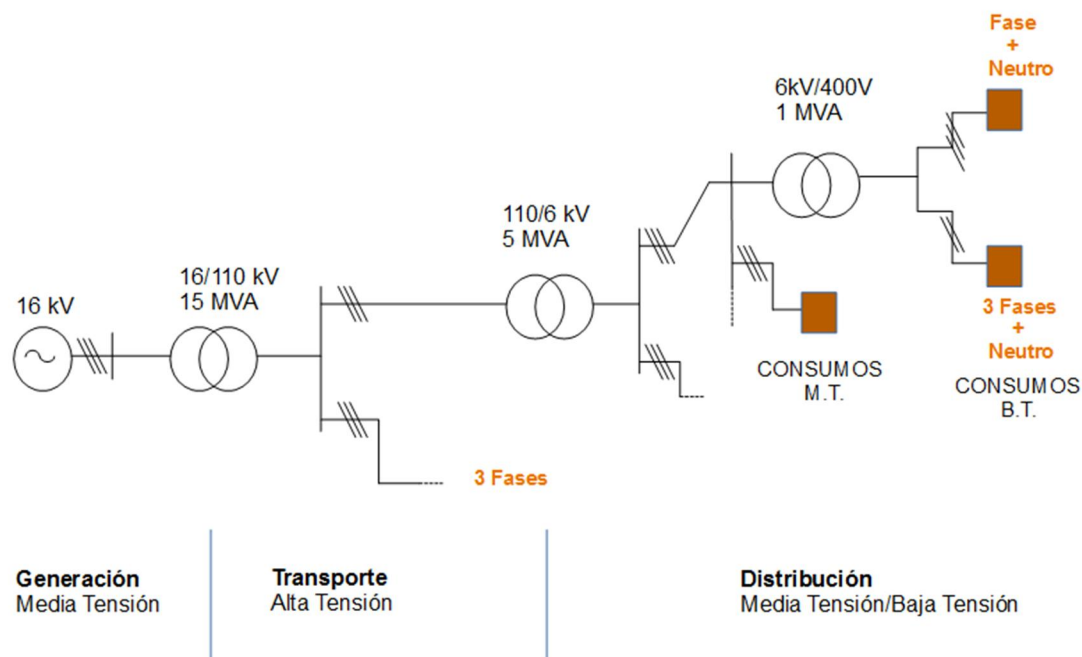


Figura 1: Esquema del suministro eléctrico

Para conseguir estos cambios de tensión se utilizan los transformadores.

Los transformadores son elementos eléctricos cuya función es la de disminuir o incrementar la tensión y la corriente, manteniendo la frecuencia que tenía al principio. Se basa en el fenómeno de inducción electromagnética y se utilizan uno o varios circuitos formados por bobinas acopladas con un núcleo común de material ferromagnético.

En el caso del suministro eléctrico, como se verá en los apartados siguientes, la forma general que éste se presenta es de forma trifásica por lo que el transformador será trifásico (ver ejemplo de la figura 2):

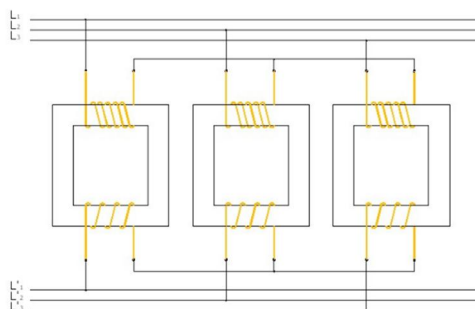


Figura 2: Transformador trifásico

3.2. Generación

El suministro eléctrico a los consumidores proviene de la energía previamente obtenida en las centrales eléctricas generadoras. Esta energía eléctrica se obtiene a partir de la transformación de otro tipo de energía a energía eléctrica.

Estas energías que se transforman se encuentran en centrales generadoras y pueden aprovecharse de la energía eólica, energía hidroeléctrica o energía nuclear, por ejemplo.

En España, la mayor parte de la producción de la energía eléctrica proviene de la energía nuclear, la energía térmica, la energía eólica y las centrales de ciclo combinado en este orden.

Existen dos grandes grupos de energías, las energías no renovables y las energías renovables. La energía no renovable, como son la nuclear y térmica, se abastece de recursos limitados del planeta como fósiles y con este tipo de energías se corre el riesgo de extinguir dichos recursos. La energía renovable, como es la eólica, se abastece de recursos inagotables del planeta como el viento, sol, movimiento...

La generación de la energía eléctrica se suele producir en niveles de media tensión ya que las propiedades de los materiales de las centrales presentan ciertas limitaciones para trabajar a los niveles de alta tensión, además esta tensión es alterna (50 ó 60 Hz) y trifásica.

La energía en el Sistema Internacional se mide en Julios J , pero para medir la producción de la energía por unidad de tiempo se utiliza el concepto de potencia, medido en Vatios W , aunque se suele utilizar el kilovatio kW .

La potencia suele variar según el tipo de central, por ejemplo, las centrales nucleares producen una potencia aproximada de 1000 MW, en cuanto a la energía eólica la potencia de cada aerogenerador variará mucho según el tipo de aerogenerador, uno estándar en condiciones óptimas puede producir una potencia aproximada entre 5 y 8 MW. La potencia de las centrales térmicas varía entre 100 y 2500 MW según su tamaño.

3.3. Transporte

El transporte de energía eléctrica se realiza mediante líneas eléctricas que enlazan las centrales generadoras y el lugar de consumo deseado. Este transporte se suele realizar en corriente alterna ya que la energía eléctrica que se obtiene en las centrales eléctricas

es mayoritariamente de tipo sinusoidal e históricamente existían los medios adecuados para modificar los niveles de este tipo de tensiones sinusoidales mediante transformadores. Además, el consumo en los hogares se realiza por lo general en corriente alterna. Actualmente, el desarrollo de la electrónica de potencia ha permitido disponer de convertidores que permiten la transformación de corriente alterna a corriente continua y viceversa de forma relativamente sencilla. Por este motivo, en la actualidad existe una creciente tendencia a realizar el transporte con líneas de corriente continua ya que ofrece diversas ventajas respecto a la corriente alterna (p. ej., menores caídas de tensión, no circulación de potencia reactiva, ...). Para transportar en corriente continua se necesitaría un convertidor de alterna a continua de la central al sistema de transporte y otro convertidor de continua a alterna para pasar del sistema de transporte a los hogares.

Por lo tanto, aunque es más económico generalmente transportar esta energía eléctrica en alterna, existen algunas excepciones en que es más favorable transportarla en corriente continua. La gran ventaja de la corriente continua es que las impedancias solo tienen componente resistiva lo que significa que tienen unas caídas de tensión en el transporte de la energía eléctrica menores que si la corriente es alterna. Debido a esto cuando la distancia entre las centrales y el lugar donde se consume la energía es elevada, se aconseja su transporte en continua, además si se tiene que transportar la energía bajo tierra, al ser la impedancia muy elevada, también es mucho más aconsejable que su transporte sea en corriente continua.

Como se puede observar en la figura 1 la tensión de la red de transporte es la denominada Alta Tensión, y suelen ser de valores superiores a 110 kV.

3.4. Distribución

Como se puede ver en la figura 1 las líneas de transporte transportan la energía eléctrica a alta tensión. Esta tensión para poder consumirse se transforma a media tensión y posteriormente a baja tensión. Las grandes industrias trabajan con media tensión por lo que no necesitan transformar esta tensión a baja tensión.

A los hogares sí que les hace falta volver a disminuir la tensión para poder conseguir baja tensión que es la que utilizan por motivos de seguridad.

Al ser normalmente el transporte en corriente alterna, la energía que llega a las estaciones transformadoras es una corriente alterna trifásica, y generalmente llega a los hogares una corriente alterna monofásica a través de una fase y el neutro de la instalación. En viviendas con consumos elevados puede ser aconsejable solicitar una

acometida trifásica en lugar de monofásica con el objeto de reducir la corriente consumida por la instalación y por tanto las caídas de tensión y las pérdidas.

Para conseguir corriente alterna monofásica se utilizarán dos cables, una fase cualquiera de las tres disponibles de la red transformadora de media tensión a baja tensión y el cable del neutro que generalmente se encuentra conectado a tierra, y se le asigna el valor de referencia de 0V. Al ser la diferencia de potencial entre fase y tierra, la tensión que se recibirá en el hogar es de 220V. La potencia activa consumida en corriente alterna monofásica se calcula con la expresión (1).

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\phi) \quad (1)$$

La potencia máxima para una instalación monofásica de 220 V que permiten todas las empresas de suministro eléctrico es de 13,86 kW, hay hogares, por ejemplo, casas rurales, o empresas que necesitan más potencia por lo que necesitarán otro tipo de instalación, la corriente alterna trifásica.

Para conseguir corriente alterna trifásica se utilizan las tres fases, como las fases están desfasadas entre ellas, se consigue una diferencia de potencial de 440 V entre fases que es la que se recibe en la instalación, una gran desventaja del sistema trifásico es que la mayor parte de los electrodomésticos que existen utilizan una tensión de 220V, por lo que no se podrá conectar a un electrodoméstico la tensión de 440 V.

La potencia activa trifásica en un sistema equilibrado alimentado por tensiones simétricas y equilibradas se calcula según (2)

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\phi) \quad (2)$$

donde U es la tensión de línea de la instalación trifásica e I es la corriente consumida.

La potencia que se puede contratar en este tipo de instalaciones tiene un mínimo de 15 kW.

El consumo en el hogar del suministro eléctrico como se ha visto en el apartado anterior es en modalidad monofásica, ya que por lo general la potencia requerida para la funcionalidad del hogar en el día a día es menor a 13,8 kW, aunque como se ha visto existen casos donde se necesita más potencia (mínimo de 15kW) por lo que se contratará una corriente eléctrica alterna trifásica.

El suministro eléctrico existe porque se da la necesidad de utilizar los aparatos eléctricos, éstos tienen unas cargas que se conectaran al suministro para poder funcionar. Para un correcto funcionamiento de todos los consumos eléctricos conectados en la instalación, la

tensión de suministro debe de ajustarse a unos parámetros y valores concretos que vienen definidos por la calidad del suministro eléctrico.

Existen dos tipos de cargas, las cargas lineales y las no lineales. Las cargas lineales son aquellas que consumen corriente sinusoidal al ser alimentadas con tensión sinusoidal, en cambio las cargas no lineales al ser alimentadas con tensiones sinusoidales, consumen corrientes no sinusoidales, Tal como se verá, este tipo de cargas introducen armónicos de corriente en la instalación contaminándola así como pudiendo distorsionar las tensiones de alimentación, es decir, alejando dichas tensiones de su característica sinusoidal deseada para el correcto funcionamiento de los diferentes consumos.

3.5. Características de tensiones y corrientes sinusoidales

Como se ha visto en el apartado anterior el suministro eléctrico formado por la generación el transporte y la distribución, se realiza tradicional y mayoritariamente en corriente alterna y a diversos niveles de tensión. Esto significa que, por las instalaciones, en condiciones normales, existirán tensiones sinusoidales y circularán corrientes sinusoidales. Estas tensiones y corrientes sinusoidales vienen caracterizadas por unos parámetros concretos que se van a presentar y describir a continuación.

3.5.1. Introducción

Las tensiones y corrientes alternas cambian su valor periódicamente respecto el tiempo con una forma sinusoidal.

Éstas se pueden representar según (3) i (4) respectivamente:

$$v(t) = V_m \cos(\omega t + \phi_u) \quad (3)$$

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \phi_i) \quad (4)$$

Las cuales vienen caracterizadas por los siguientes parámetros:

- Valor máximo de la tensión V_m y valor máximo de la intensidad I_m
- Pulsación angular ω .
- Desfase de la tensión ϕ_u y desfase de la intensidad ϕ_i

Estos parámetros se encuentran reflejados en el ejemplo de tensión sinusoidal de la figura 3.

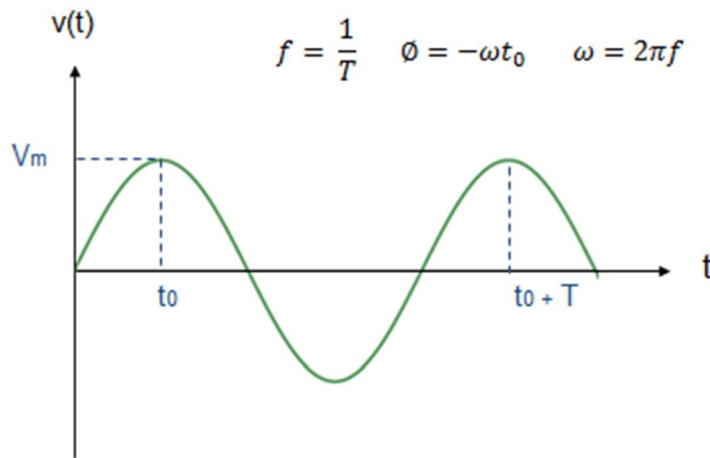


Figura 3: Onda sinusoidal con sus parámetros principales

3.5.2. El periodo y la frecuencia

Una característica de la onda sinusoidal como se ha comentado en la introducción de este apartado es que su forma se repite de forma periódica y cumple (5),

$$f(t) = f(t + Nt)(N = 1, 2, \dots) \quad (5)$$

El tiempo que tarda la función en repetirse se denomina periodo T , y se mide en segundos.

La inversa del periodo es la frecuencia $f = 1/T$, que es el número de ciclos por segundo de la función y su unidad son los Hertz (Hz).

El parámetro ω es la frecuencia angular de la onda sinusoidal, tiene unidades de radianes, rad, y se calcula según,

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (6)$$

3.5.3. Amplitud y Valor eficaz

Una onda sinusoidal presenta un valor máximo y un valor mínimo. A este valor máximo se le llama amplitud o valor de máximo de la tensión, V_m (ver Fig. 3).

Habitualmente las tensiones y corrientes sinusoidales se caracterizan a partir de su valor eficaz (*Root Mean Square value*, RMS value) definido según,

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

Expresando la función sinusoidal en función del valor eficaz se tiene,

$$v(t) = \sqrt{2}V_{rms} \cdot \cos(\omega t + \phi_u) \quad (8)$$

3.5.4. Ángulo de Fase

El ángulo de fase de cualquier onda sinusoidal como puede en (3) caracteriza la fase que tiene la función en el instante. Normalmente las unidades de este ángulo de fase suelen expresarse en grados, aunque para operar en el SI se debe de trabajar en rad.

3.6. Ondas de tensión sinusoidales trifásicas

El sistema eléctrico está formado por tres hilos que corresponden cada uno a las fases del sistema, y además del neutro que se acostumbra a poner a tierra para tener una referencia de 0V, esto es llamado sistema trifásico de tensiones. Se dan casos donde el neutro no existe como en el transporte en Media o Alta Tensión.

Las tensiones de suministro de los sistemas pueden ser de dos tipos de tensiones, de fase (o sencillas) y de línea (o compuestas).

Las tensiones de fase son aquellas tensiones medidas entre fase y el neutro, como ya se ha comentado en el apartado 4.3, así se consigue el suministro monofásico. Las tensiones de línea son aquellas tensiones medidas entre fases que permiten conseguir el suministro trifásico comentado en el apartado 4.3.

Generalmente los sistemas trifásicos de tensiones son simétricos y equilibrados, como el mostrado en la figura 5. Para que un sistema sea simétrico sus tensiones de línea deben tener el mismo módulo como se puede ver en la figura 5. Para que un sistema trifásico sea equilibrado, las sumas de las tensiones de fase deben ser cero como puede verse en (9). Esto significa que el neutro debe estar situado en el centro de gravedad del triángulo de tensiones de línea (ver fig. 5),

$$\underline{U}_{AN} + \underline{U}_{BN} + \underline{U}_{CN} = 0 \quad (9)$$

Si el sistema trifásico sea equilibrado y simétrico los módulos de las tensiones de línea son iguales y el neutro está en el centro de gravedad de su triángulo lo que comporta que

tanto las tensiones de línea como las de fase son iguales y están desfasadas 120° entre ellas.

A continuación, se muestra una tabla de ecuaciones que cumplen las tensiones de fase y las tensiones sencillas:

Tensiones sencillas	Tensiones de fase
$U_{AN} = \frac{U}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ$	$U_{AB} = U \angle 30^\circ$
$U_{BN} = \frac{U}{\sqrt{3}} \angle -120^\circ$	$U_{BC} = U \angle -90^\circ$
$U_{CN} = \frac{U}{\sqrt{3}} \angle 120^\circ$	$U_{CB} = U \angle 180^\circ$

Tabla 2: Tensiones de fase y de línea en un sistema simétrico y equilibrado

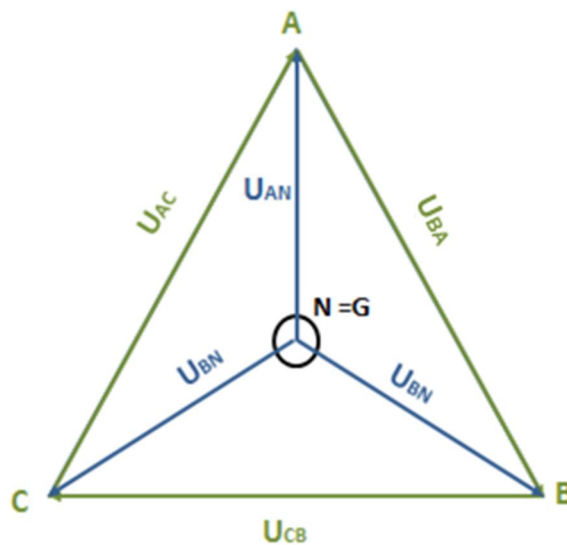


Figura 4: Triángulo de tensiones de un sistema trifásico

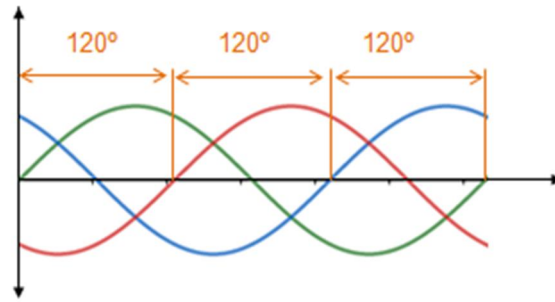


Figura 5: Tensiones trifásicas de fase en un sistema trifásico simétrico y equilibrado

Se busca siempre que el sistema trifásico sea simétrico y equilibrado ya que así el sistema trabaja en condiciones óptimas.

Sin embargo, puede ser que existan perturbaciones en el sistema eléctrico que haga que el sistema deje de ser simétrico y equilibrado, por lo que dejara de tener sus tensiones desfasadas 120° y no tendrán tampoco el mismo módulo.

4. Norma UNE-EN-50160

4.1. Introducción

UNE es el acrónimo de Una Norma Española, son una serie de documentos normativos creados en los Comités Técnicos de Normalización (CTN) de la Asociación Española de Normalización. Estos documentos tienen como finalidad asegurar la calidad de los productos o servicios.

En particular la Norma UNE-EN-50160 normaliza las características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución a los consumidores. Por lo tanto, los parámetros presentados en el capítulo 4, para cumplir con la calidad exigida, deben encontrarse dentro de un rango fijado en la norma. El borrador de esta norma fue escrito y posteriormente aprobado por el Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC).

Toda la norma está dividida en dos niveles de tensión, la baja tensión (BT) y la alta tensión (AT). La baja tensión es aquella en que el valor de la tensión eficaz nominal es menor a 1kV. La media tensión es aquella tensión en que el valor de la tensión eficaz normal se encuentra entre 1kV y 35kV. No se estudian otras situaciones ya que el suministro se da siempre o a BT o a MT.

4.2. El periodo y la frecuencia

La frecuencia en condiciones normales debe ser de 50Hz, pero puede también entrar en los parámetros aceptables de la calidad eléctrica si la media de la frecuencia fundamental medida por períodos de 10s se encuentra entre los rangos que definiremos a continuación.

Tanto para BT como para MT se distingue si el suministro es para una red acoplada por conexiones síncronas a un sistema interconectado o si el suministro es para redes sin conexión síncrona a un sistema interconectado, además los rangos de Baja Tensión y de Media Tensión son los mismos.

Se entiende por sistemas con conexiones síncronas aquellos en los que la red es alimentada por uno o varios generadores síncronos de elevada potencia que imponen y fijan la frecuencia de las tensiones de alimentación de la red. Son los sistemas eléctricos mayoritarios y en ellos las variaciones de la frecuencia frente a cualquier perturbación

eléctrica son reducidas gracias a la capacidad de respuesta de los generadores que alimentan el sistema de potencia.

Para este tipo de redes y en régimen de Baja Tensión y Media Tensión se exige que el 100% del tiempo la frecuencia se encuentre entre 47 y 52Hz, y en un año el 99,5% del tiempo la frecuencia deberá encontrarse entre 49,5Hz y 50,5Hz.

Se entiende por sistemas sin conexiones síncronas aquellos en los que la red está aislada de la red o redes principales (por ejemplo, sistemas eléctricos insulares). Estos sistemas están alimentados por generadores síncronos de reducida potencia y baja inercia y por ello las variaciones de frecuencia que se producen en caso de perturbaciones son muy superiores a que las que se experimentan en los sistemas fuertemente interconectados con conexiones síncronas. Además, las redes eléctricas de los sistemas insulares están por lo general poco malladas lo que supone un problema adicional a las posibles variaciones de la frecuencia.

Para este tipo de redes en régimen de Baja Tensión y de Media Tensión se exige que el 100% del tiempo la frecuencia se encuentre entre 42,5Hz y 57,5Hz y durante el 95% de una semana entre 49 y 51Hz.

4.3. Amplitud de la tensión suministrada

Para baja tensión, la tensión tiene unos valores ideales llamada tensión nominal normalizada U_n , que se distingue entre el tipo de sistema trifásico que se puede encontrar.

En los sistemas trifásicos de 4 conductores (recordar que son los 3 conductores de fase y el cuarto es el neutro), el valor debería ser 230V entre una fase cualquiera y el neutro.

En los sistemas trifásicos de 3 conductores (3 fases), el valor de la tensión nominal normalizada es de 230V entre las fases.

Esta tensión no siempre se puede mantener a 230V debido a numerosos factores, por lo que la norma indica que promediando el valor de la tensión cada 10 minutos, durante una semana, el 95% de los valores de la tensión promedia deben situarse en un intervalo de [207,253] V, y promediando los valores de la tensión cada 10 minutos, estos valores deben estar en el intervalo de [195,5, 253] V.

Para la media tensión, la amplitud de la tensión es la tensión declarada.

La tensión declarada es aquella tensión acordada entre consumidor y distribuido. Esta tensión suele ser la nominal, pero puede ser diferente si el consumidor lo requiere.

En periodos de una semana, promediando los valores eficaces en 10 minutos, el 95% de ellos deben estar entre los rangos de $U_c \pm 10\%$.

5. Perturbaciones eléctricas

5.1. Introducción

El suministro eléctrico ideal se puede ver alterado por las llamadas perturbaciones eléctricas que son aquellos fenómenos que hacen disminuir la calidad del suministro haciendo alejarse a las características y a los valores de los parámetros del suministro de los rangos preestablecidos en la norma de calidad (ver Capítulo 5)

Existen distintas maneras de clasificar las perturbaciones, este trabajo se centrará en las que la Norma UNE estudia, y son las que se explicarán a continuación.

5.2. Armónicos

Las ondas de tensión e intensidad del suministro eléctrico idealmente presentan una forma sinusoidal pero debido a la presencia de cargas no lineales en el sistema eléctrico, pueden producirse alteraciones de la forma sinusoidal y pasar a presentar los llamados armónicos.

Las ondas de intensidad del suministro eléctrico inicialmente presentan una forma sinusoidal con todas las características presentadas en el capítulo 3.

Si una carga lineal es alimentada con tensión sinusoidal consumirá intensidades sinusoidales, como se puede ver en la figura 6 y por lo tanto no se verán distorsionadas las corrientes del sistema.

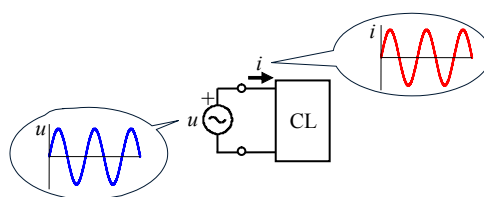


Figura 6: Circuito eléctrico con una carga lineal.

En cambio, si el circuito está formado por una carga no lineal, esta carga no lineal consumirá una corriente no sinusoidal aun estando alimentada por tensión sinusoidal, por lo que la intensidad que circulará en el circuito al haber alimentado la carga no lineal será una intensidad con presencia de armónicos, tal y como se puede ver en la figura 6.

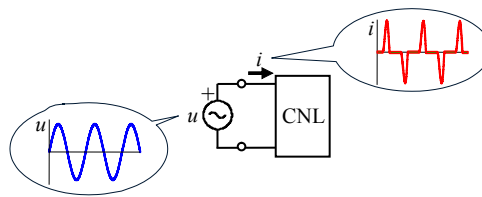


Figura 7: Circuito eléctrico con una carga no lineal.

El tipo de carga sea lineal o no lineal, depende de la naturaleza del dispositivo.

Los dispositivos que se caracterizan como cargas lineales son por ejemplo las lámparas incandescentes, los motores no saturados o las cargas resistivas. Los dispositivos que sí son cargas no lineales se dividen en tres grandes familias: los dispositivos con arcos de descarga, los dispositivos electrónicos y los dispositivos con inductancias saturadas.

En el momento en que la onda de corriente ya no presenta la forma sinusoidal, gracias al análisis de Fourier, podemos descomponer la onda en su forma sinusoidal fundamental además de otras ondas de frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental, son las llamadas ondas armónicas.

En la figura siguiente tenemos un ejemplo de descomposición de Fourier de una onda de corriente. Podemos ver que la onda original es la de color gris y como ésta no tiene una forma sinusoidal perfecta. Las diferentes ondas que vemos en la figura 8 son aquellas que forman la descomposición de Fourier. La onda de color negra es la onda fundamental y su frecuencia es la que sirve de referencia para caracterizar las ondas armónicas que conforman la descomposición y que podemos ver de color azul verde y rojo.

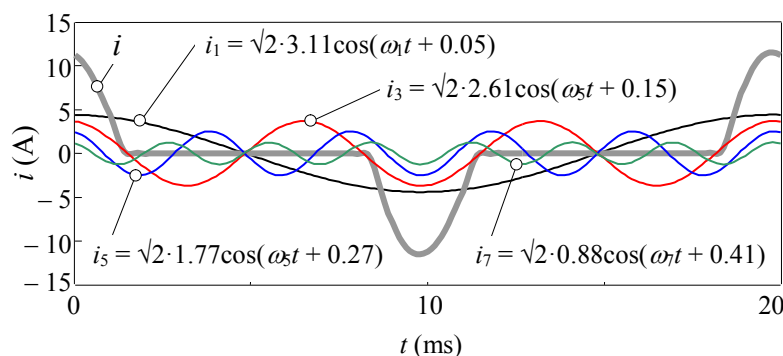


Figura 8: Descomposición de Fourier de una onda de corriente.

En el momento en que la intensidad se deforma y pierde la forma sinusoidal, se deforma la onda de tensión al atravesar una impedancia por la ley de Ohm y en consecuencia todas las ondas de tensión del circuito se distorsionan y alejan de su forma sinusoidal, como se puede ver en la figura siguiente:

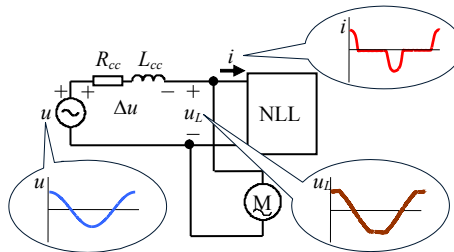


Figura 9: Circuito eléctrico con la tensión y la corriente deformadas.

La deformación de la onda de tensión se puede caracterizar mediante el análisis de Fourier exactamente igual que la onda de corriente, y así se encuentran los armónicos de tensión también.

La presencia de estos armónicos tanto en la tensión como en la corriente se puede caracterizar gracias a la tasa de distorsión armónica *THD*, como se muestra en la ecuación (10)

$$THD = \sqrt{\sum \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2} \quad (10)$$

La distorsión armónica individual *HD* se define con la ecuación siguiente:

$$HD = \frac{I_n}{I_1} \times 100\% \quad (11)$$

Por último, también, se dispone de otro tipo de caracterización equivalente a la distorsión armónica individual llamado Factor de distorsión *FdD* que es la relación entre el valor RMS de la onda fundamental y el valor RMS total, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$FdD = \frac{I_1}{I_{total}} \quad (12)$$

La Norma UNE-EN-50160 regula los valores eficaces de las tensiones de los armónicos en Baja y Media Tensión, estos valores están representados en una tabla de la norma para los dos tipos de tensiones, esta tabla es la siguiente:

Armónicos impares				Armónicos pares	
No múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Orden h	Tensión relativa	Orden h	Tensión relativa	Orden h	Tensión relativa
5	6%	3	5%	2	2%
7	5%	9	1,5%	4	1%
11	3,5%	15	0,5%	6...24	0,5%
13	3%	21	0,5%		
17	2%				
19	1,5%				
23	1,5%				
25	1,5%				
NOTA – Los valores que corresponden a los armónicos de orden superior a 25, que son generalmente débiles y muy imprevisibles debido a los efectos de resonancia, no están indicados en esta tabla.					

1

Tabla 2: Rangos de valor que puede tener la tensión de los armónicos.

Las cargas no lineales que producen estas corrientes armónicas pueden clasificarse según el sector donde se encuentran como se puede ver en la siguiente tabla:

¹ Tabla extraída de la norma UNE-EN-50160

Aplicaciones		Sector industrial	Sector comercial	Sector residencial
CNLs en los sistemas de distribución	Cargas monofásicas	Equipos industriales: - Controladores lógicos progr. (PLCs) - Ordenadores personales (PCs) ... Sistemas de iluminación: - Lámparas descarga con balasto magnético - Lámparas descarga con balasto electrónico	Equipos industriales: - Ordenadores personales (PCs) - Fax, fotocopiadoras ... Sistemas de iluminación: - Lámparas descarga con balasto magnético - Lámparas descarga con balasto electrónico	Equipos industriales: - Ordenadores personales (PCs) - TVs, dispositivos audiovisuales ... Sistemas de iluminación: - Lámparas descarga con balasto magnético - Lámparas descarga con balasto electrónico
			Equipos comerciales: - Sistemas de alimentación ininterr. (SAIs) Equipos de climatización: - Bombas de calor y aire acondicionado	Equipos de climatización: - Bombas de calor y aire acondicionado Electrodomésticos: - Vitrocerámicas, hornos ...
	Cargas trifásicas	Equipos comerciales: - Sistemas de alimentación ininterr. (SAIs) " ... Equipos de climatización: - Bombas de calor y aire acondicionado Maquinaria industrial: - Variadores de velocidad motores AC - Variadores de velocidad motores DC Otras aplicaciones industriales: - Equipos de soldadura - Equipos de calentamiento por inducción ...	Equipos de climatización: - Bombas de calor y aire acondicionado	

Tabla 3: Clasificación de las cargas no lineales según su sector.

La presencia de estos armónicos afecta a los siguientes dispositivos cuando forman parte del circuito eléctrico:

Condensadores

La presencia de armónicos produce dos efectos negativos en los condensadores. El primero es una sobrecarga de los condensadores, ya que la intensidad de una corriente con presencia de armónicos se incrementa en módulo respecto a la intensidad de una corriente sin armónicos. El segundo efecto negativo es que aumenta las pérdidas de carga del condensador. Además, los condensadores provocan el fenómeno de la resonancia que puede llegar a incrementar los armónicos en el sistema eléctrico si la frecuencia de dicha resonancia está próxima a la de los armónicos de corriente consumidos por las cargas no lineales.

Transformadores

El principal efecto negativo por la presencia de armónicos en los transformadores es el incremento de las pérdidas en el núcleo del transformador y en los devanados por efecto Joule lo que puede producir el sobrecalentamiento del transformador.

Cables y conductor neutro

Debido al aumento de la intensidad como se ha visto anteriormente, las pérdidas aumentarían tanto en los cables como en el conductor neutro de la instalación de suministro eléctrico. La corriente de los armónicos múltiplos de tres que circula por el conductor eléctrico en instalaciones que alimenten cargas no lineales monofásicas puede llegar a ser el triple de las corrientes que circulan por las fases.

Motores

Los armónicos pueden producir oscilaciones en el par que produce el motor provocando un aumento del ruido del motor y una reducción de la vida media del motor. También se producen mayores pérdidas en las diferentes partes que conforman el motor como puede ser el rotor el estator o el circuito magnético.

Equipos electrónicos

Los armónicos producirán un mal funcionamiento general de los equipos electrónicos. En los ordenadores y en otro equipo electrónico producirán un mal funcionamiento y puede llegar a apagarse el equipo ya que estos equipos son muy sensibles a las fluctuaciones de voltaje. Además, puede producirse una variación de la luminosidad de las televisiones y pantallas de ordenadores que presentan corrientes armónicas.

Para solucionar todos estos efectos negativos que encontramos en los dispositivos en los que su intensidad está contaminada por armónicos se suelen instalar en las redes eléctricos filtros para los armónicos y si no es suficiente o se quiere optar por otras soluciones, también se puede en vez de eliminar la fuente de problemas, proteger los dispositivos sobredimensionándolos o cambiando su material para hacerlo más resistente.

5.3. Interarmónicos

Como se ha explicado en el apartado 6.2. las ondas sinusoidales se pueden aproximar mediante el análisis de Fourier.

Se ha visto cómo existe la onda de frecuencia fundamental y también las ondas armónicas, aquellas que su frecuencia es múltiplo natural de la frecuencia de la onda fundamental. Existen también en este análisis de Fourier otro tipo de ondas sinusoidales, las llamas ondas interarmónicas. Las ondas interarmónicas son aquellas ondas que su frecuencia no es múltiplo natural de la frecuencia de la onda fundamental.

En el caso de la red eléctrica hablaremos de interarmónicos de tensión e interarmónicos de corriente cuando la frecuencia de estas ondas no sea múltiplo natural de las ondas de tensión o de corriente fundamental.

Existen dos maneras de generación de interarmónicos. La primera manera en que se generan interarmónicos es cuando se dan variaciones bruscas en la corriente de una instalación. La segunda manera es la conmutación asíncrona, de los dispositivos semiconductores de los convertidores estáticos.

Al ser un fenómeno relativamente nuevo, no existen límites en la norma para el valor de las tensiones de estos interarmónicos.

Los efectos de estos interarmónicos son un aumento de calor producido por el efecto Joule, oscilaciones no deseadas de frecuencia baja en sistemas mecánicos y torsionales en máquinas eléctricas, saturaciones en los transformadores de corriente, y el fenómeno Flicker, que se estudiará en el apartado 6.5.

5.4. Reducción o incremento de la tensión

La tensión suministrada debe tener un valor eficaz constante, conocido y pactado por el consumidor y el distribuidor que por lo general son 230 V, pero puede pactar un valor diferente. Cuando este valor eficaz se aleja del valor eficaz acordado, se habla de una reducción, si el valor ha bajado, o un incremento, si el valor ha aumentado, de la tensión.

A su vez estas reducciones se pueden clasificar según su duración y magnitud como se va a ver a continuación.

5.4.1. Subtensión y Sobretenión

Una subtensión se da cuando hay una reducción del valor eficaz de la tensión en corriente alterna, la frecuencia debe seguir siendo la del suministro y la duración superior a un minuto.

Una subtensión es una perturbación en el suministro eléctrico que afecta el valor eficaz de la corriente alterna.

La frecuencia de la tensión en estos periodos de subtensión debe seguir siendo la frecuencia de la tensión sin anomalía, el parámetro que cambia es únicamente el valor eficaz.

La duración de esta reducción de valor eficaz de tensión debe ser superior al minuto.

Cuando en vez de una reducción del valor eficaz de la tensión de la corriente alterna el fenómeno que se da es un aumento, siendo la duración del fenómeno de aumento de tensión mayor a un minuto, y la frecuencia la misma que la de la onda sin anomalía, estamos hablando de una sobretensión.

El origen de las subtensiones suele ser averías de la compañía, cortocircuitos en otras líneas que afectarán directamente en el voltaje de la misma, errores de regulación o conexiones a grandes clientes. Las subtensiones dificultarán el arranque de los motores que estén conectados a la red eléctrica en el momento de la subtensión ya que no tendrán voltaje suficiente como para poder iniciar su ciclo de trabajo. También producirán una mala conexión entre contactores i relés. Además, puede fluctuar la luminosidad produciendo una sensación desagradable o perjudicial para la vista humana.

El origen de las sobretensiones suele ser maniobras en las instalaciones eléctricas mal efectuadas, defectos en las líneas eléctricas. Sus efectos pueden ser interrupciones o degradaciones en los sistemas, pudiendo llegar a quemar el sistema si la sobretensión es de magnitud muy elevada.

5.4.2. Huecos de tensión

Los huecos de tensión son una reducción del valor eficaz de la tensión de la tensión en corriente alterna de entre un 10% y un 90% del valor eficaz inicial. Su duración se sitúa entre 0,5 periodos a 30 periodos, estos valores corresponden a 10ms y 1 minuto.

Sus causas pueden ser cortocircuitos, el arranque de grandes motores y la corriente de magnetización de los transformadores.

Los huecos de tensión pueden ser caracterizados según los parámetros siguientes:

Duración: tiempo en el que se da la reducción de voltaje.

Profundidad: Reducción del voltaje respecto al voltaje que debería tener en condiciones normales.

Punto de inicio en la onda: instante de referencia en el que empieza el fenómeno de hueco de tensión.

También, se pueden clasificar los huecos de tensión en los tipos mostrados en la figura 10, siendo el tipo A, el tipo B y el tipo C, los tipos de hueco de tensión más frecuentes.

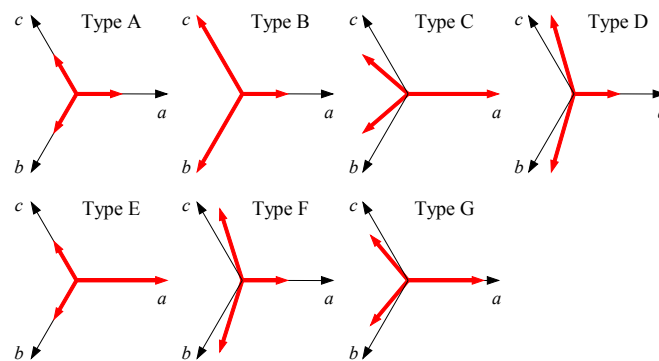


Figura 10: Tipos de huecos de tensión.

El efecto del hueco de tensión dependerá del dispositivo donde se haya dado esta perturbación. A continuación, estudiaremos los dispositivos donde es más común encontrarnos este tipo de fenómenos.

- Contactor: es un dispositivo capaz de conmutar la corriente eléctrica de un receptor o instalación con la particularidad de poder hacerlo a distancia. Estos dispositivos tienen dos modalidades, estado neutro en el que el contactor no recibe orden ni ejecuta orden alguna y estado inestable, en la que el contactor ejecuta la acción de corte de la corriente eléctrica.

El hueco de tensión provoca una disminución en la intensidad de la corriente alterna, lo que provoca que el contactor cambie de estado neutro a inestable sin que fuese ésa la intención.

- Rectificador monofásico (PC): Es un dispositivo capaz de convertir una corriente alterna en corriente continua. El efecto de los huecos de tensión sobre este tipo de dispositivos es, debido a las fluctuaciones de voltaje, un mal funcionamiento y puede llegar a originar que el dispositivo deje de funcionar.
- Rectificador trifásico filtro capacitivo (ASD): Es un rectificador con las mismas funciones que el rectificador monofásico, su diferencia es que la alimentación de los rectificadores trifásicos son las fuentes trifásicas. Gracias al filtro capacitivo, se consigue reducir el voltaje de rizo

Los huecos de tensión producen los mismos efectos que en los rectificadores monofásicos

- Motor de inducción: El efecto de los huecos de tensión sobre los motores de inducción es una disminución en la velocidad del motor durante el periodo del

hueco de tensión y la generación de picos en el par de la máquina y en la corriente consumida durante el inicio y recuperación del hueco. Los picos de par pueden llegar a suponer una detención del motor.

- Transformador trifásico: Los huecos de tensión sobre los transformadores trifásicos pueden provocar picos de corriente en el instante de la recuperación del hueco.
- Aerogeneradores: Es un dispositivo que transforma la energía cinética conseguida gracias al viento en energía eléctrica.

Cuando un aerogenerador detecta un hueco de tensión se desconecta de la red eléctrica por seguridad, lo que provoca pérdidas de suministro eléctrico en las zonas donde proveen de energía eléctrica los aerogeneradores.

Las soluciones para que los efectos de estos huecos de tensión no sean tan perjudiciales, son hacer modificaciones en la alimentación del circuito eléctrico o en el equipo eléctrico.

Modificaciones en la alimentación del circuito eléctrico son hacer cambios en la red para disminuir las faltas y el clearing time o cambiar el diseño del sistema.

En cuanto a la modificación del equipo, se pueden introducir elementos de seguridad en el sistema que mitiguen los huecos de tensión, por ejemplo.

5.4.3. Interrupciones

Las interrupciones son una perturbación en la que hay una pérdida total de tensión de las tres fases de la corriente alterna durante un periodo reducido de tiempo, que puede oscilar entre pocos segundos a pocos minutos.

Las causas más comunes de estas interrupciones son fallos en la red eléctrica de la compañía de suministro o fallos en la instalación del cliente.

El origen de estas interrupciones puede ser interno o externo a la red eléctrica. Por ejemplo, un origen interno a la red eléctrico es un mal aislamiento del sistema o una incorrecta ejecución de maniobra. Un ejemplo de origen externo a la red eléctrica sería una descarga atmosférica como puede ser un rayo.

Los efectos de estas interrupciones pueden darse en dispositivos varios:

- Equipos informáticos: Por culpa de la interrupción de la tensión en el suministro, se produce un apagón en el sistema informático.

- Sistemas de control: se produce una pérdida del control del proceso.
- Equipos de protección: disparo de interruptores y fusibles.

5.5. Flicker o parpadeo

El Flicker es un problema relacionado con la percepción de los seres humanos y la luz incandescente, es una impresión subjetiva de la fluctuación de la luz, que puede llegar a ser muy molesta.

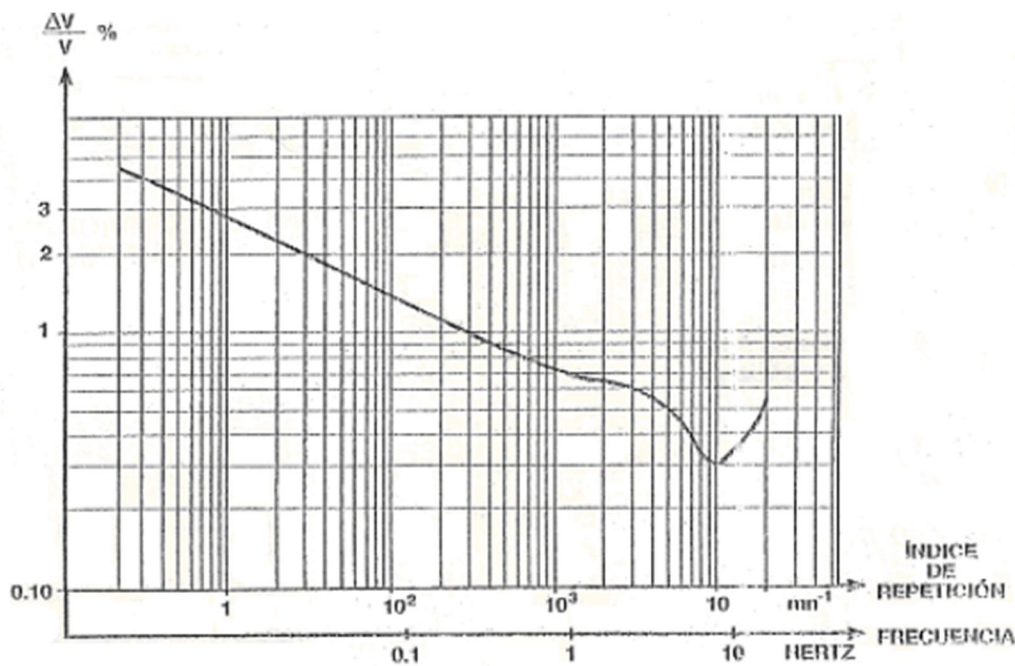
El origen de este fenómeno está en las fluctuaciones bruscas en las tensiones de la red de las lámparas incandescentes. La amplitud de estas fluctuaciones suele ser menor a un 10% de la tensión nominal de la red.

Existen dos parámetros para medir la severidad del Flicker, el Short Term Perceptibility (Pst) y el Long Term Perceptibility (Plt).

El Pst sería el estudio, como dice su nombre en inglés, del fenómeno en un período corto, 10 minutos, y presenta la siguiente fórmula:

$$Pst = [K_{0.1}P_{0.1} + K_1P_1 + K_3P_3 + K_{10}P_{10} + K_5P_5]^1/2 \quad (12)$$

Los coeficientes K_n i P_n se leen de un gráfico de probabilidad acumulativa del fenómeno, donde K_n es el coeficiente de ponderación, que ha sido calculado y marcado previamente y P_n es el percentil de probabilidad n de la curva. En la siguiente figura se ve una curva de probabilidad acumulativa.



2

Figura 11: Curva de probabilidad acumulativa

El Plt es el estudio en un periodo largo del fenómeno Flicker. Este periodo suele ser de aproximadamente 2 horas y para calcularlo se utiliza el Pst. Su fórmula es la siguiente (ecuación 13):

$$Plt = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N Pst_i}{N}} \quad (13)$$

La UNE define un Plt $\leq 1\%$ durante un 95% del tiempo.

Los efectos del Flicker como se ha comentado anteriormente son una sensación visual desagradable que puede llegar a producir efectos perjudiciales en la salud de las personas.

5.6. Desequilibrios

Se ha comentado en el apartado 4.6 que cuando un sistema de tensiones trifásico es equilibrado, el neutro de este sistema se encuentra en el centro de gravedad del mismo. Cuando este neutro no se encuentra en el centro de gravedad, se dice que el sistema no es equilibrado.

² Tabla extraída de Tesis de Grado: Estudio del Flicker en una instalación eléctrica. Autor: Hugo Ramírez Pila Pila y Manuel Iván Zambrano Reasco.

Podemos ver la comparativa entre un sistema equilibrado y un sistema desequilibrado en las figuras siguientes. En la primera figura se puede ver como el neutro se encuentra en el centro geométrico, en cambio la siguiente figura, se observa que el centro geométrico no corresponde con el lugar donde se encuentra el neutro del sistema de tensiones.

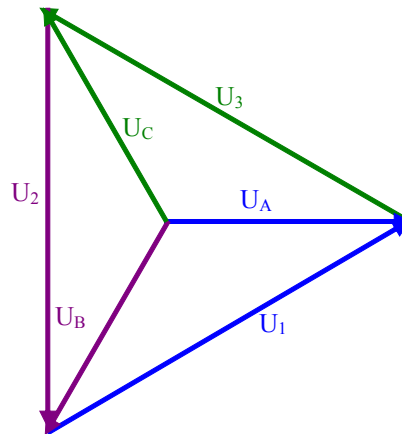


Figura 12: Sistema de tensiones trifásico equilibrado.

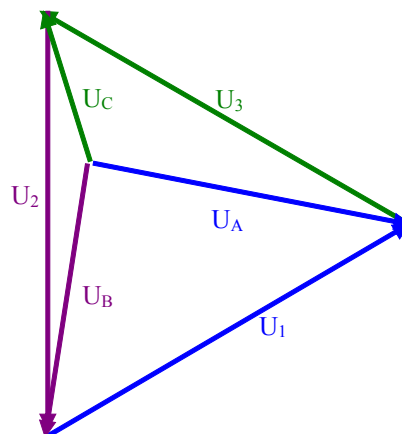


Figura 13: Sistema de tensiones trifásico desequilibrado.

Las causas de estos desequilibrios son muy diversas, pero la principal es la distinta potencia de las cargas monofásicas conectadas al sistema trifásico, como por ejemplo en los ferrocarriles, ya que su red de suministro es trifásica y su sistema de tracción actúa como una carga monofásica de elevada potencia que produce desequilibrios de tensión.

Los efectos de estos desequilibrios son una modificación del neutro haciendo que los motores conectados a estos sistemas desequilibrados se sobrecalienten, también

producen oscilaciones en el par del motor y problemas en el funcionamiento y rendimiento de los transformadores trifásicos.

Para medir el desequilibrio se utiliza la relación siguiente llamada grado de desequilibrio.

$$K_D = \frac{U_0}{U_d} \quad (9)$$

U_0 es el módulo de la tensión de secuencia homopolar y U_d es el vector de tensión de secuencia directa.

La UNE indica que los valores de este grado de desequilibrio en condiciones normales de explotación deben situarse entre el 0 y 2 %.

6. Aplicaciones: estudios de las perturbaciones

A continuación, se van a analizar las perturbaciones ya presentadas a partir de una aplicación Matlab creada para el estudio de la calidad de ondas eléctricas [9].

6.1. Armónicos

La siguiente figura es la representación de un sistema trifásico sinusoidal con presencia de multitud de armónicos.

Como se ha explicado anteriormente en el apartado 6.2. la presencia de cargas no lineales favorece la modificación de la onda sinusoidal para llegar a convertirla en una onda con una forma muy diferente como es el caso del sistema de la figura siguiente.

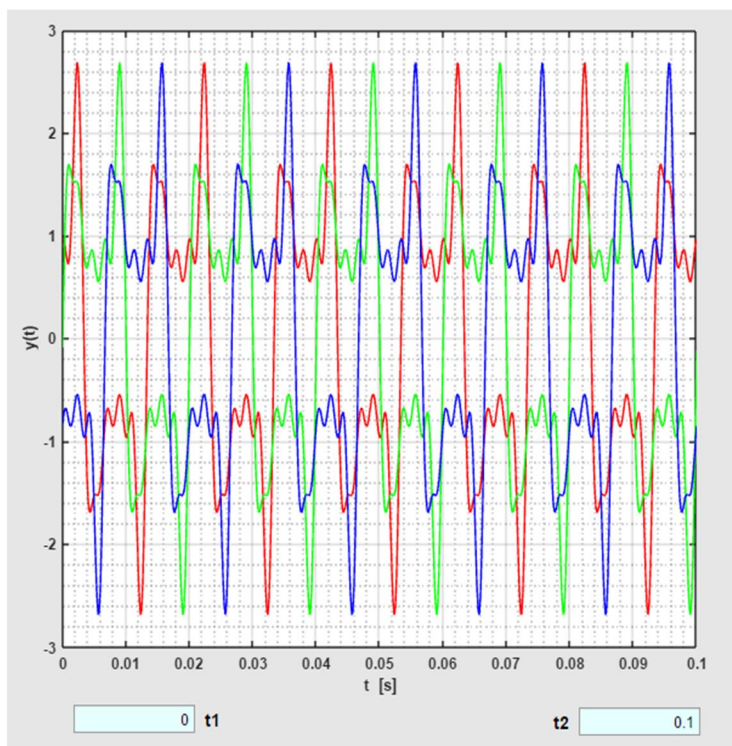


Figura 14: Representación de un sistema trifásico con armónicos

6.2. Reducción o incremento de tensión

6.2.1. Huecos de tensión

La siguiente figura presenta un hueco de tensión de tipo A desde el instante 0,05s, de una duración de 0.01 s. Su profundidad es de un 70%.

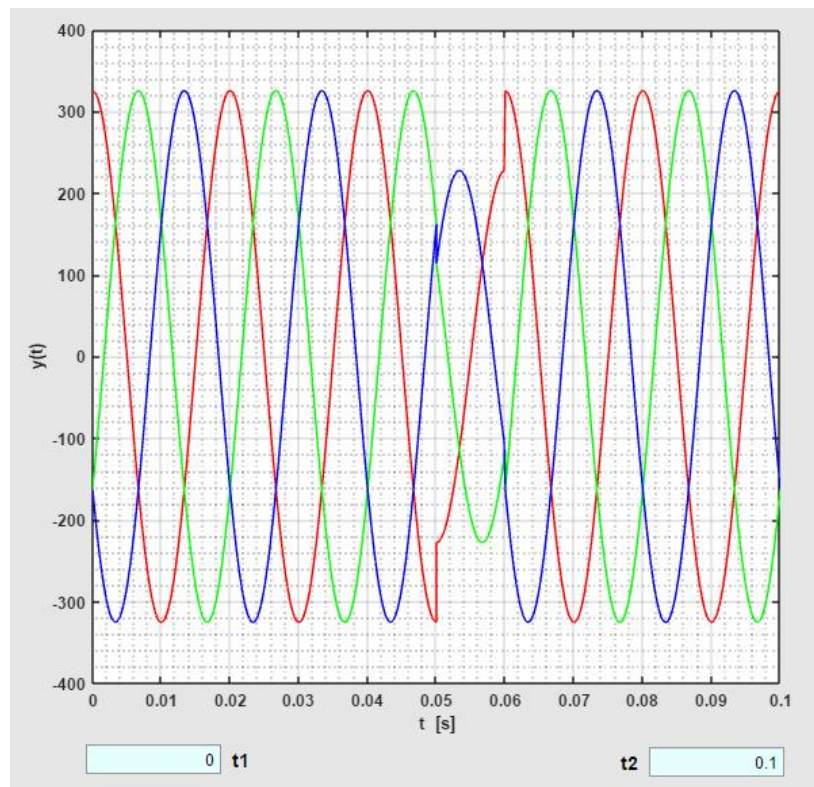


Figura 15: Representación de un sistema trifásico con un hueco de tensión

6.2.2. Interrupciones

La siguiente figura presenta una interrupción desde el segundo 0,05 hasta el segundo 0,06.

Como se ha explicado en el apartado 6.43 en las interrupciones la corriente o voltaje del sistema trifásico pasa ser nula.

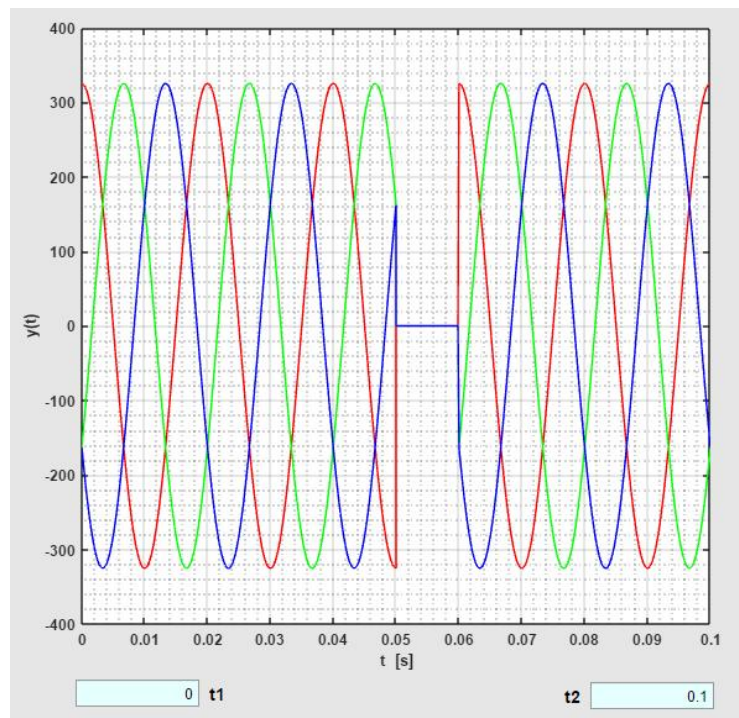


Figura 16: Representación de un sistema trifásico con una interrupción

6.3. Flicker

En la siguiente figura se puede ver la representación de la perturbación Flicker. Al ser variaciones rápidas de tensión como se puede comprobar en la figura, se aprecia una señal con ruido.

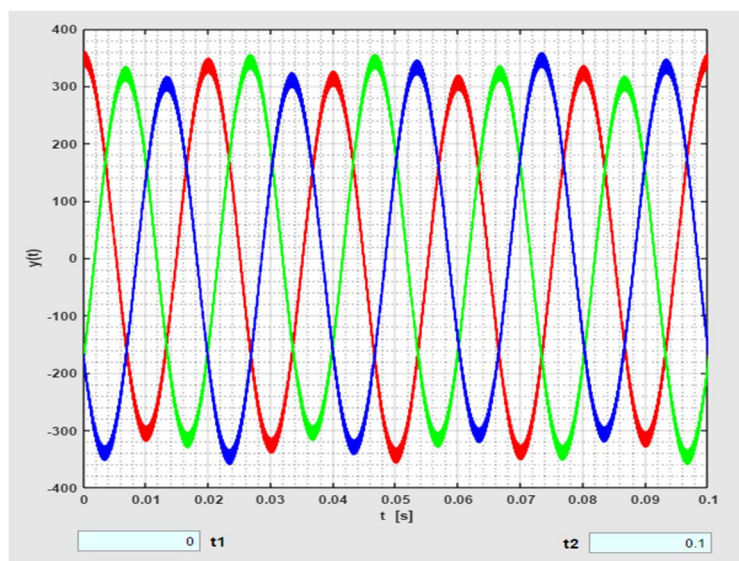


Figura 17: Representación de un sistema trifásico con Flicker

Para poder ver mejor las variaciones de tensión de estas ondas sinusoidales se ha hecho una representación con una escala mayor. Esta representación se puede ver en la figura siguiente, donde se ve de manera clara como varía rápidamente el valor.

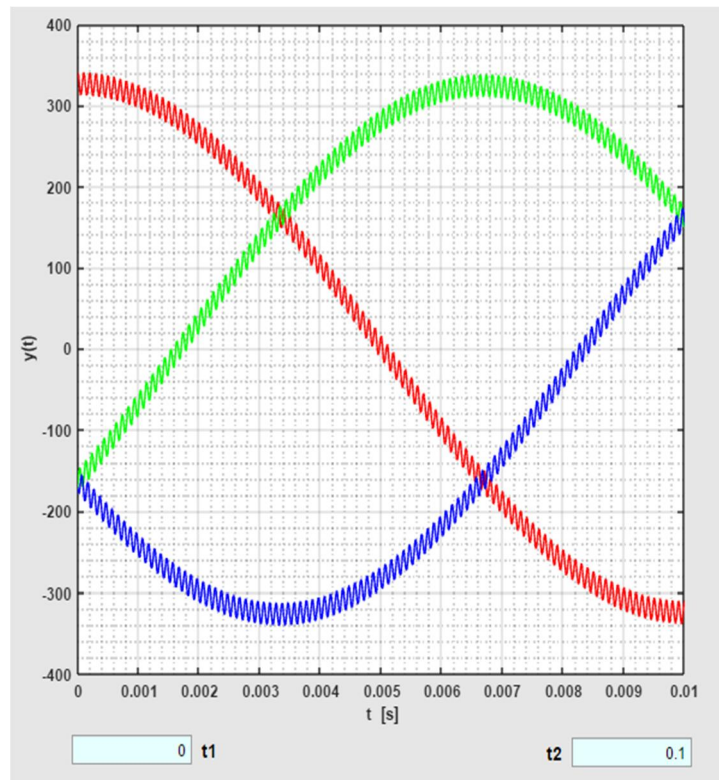


Figura 18: Ampliación de una representación de un sistema trifásico con Flicker

6.4. Desequilibrios

En la siguiente figura puede verse como se ha generado un sistema trifásico con un desequilibrio, ya que las tres ondas no son iguales en módulo, además el sistema no está desfasado 120° . Para la fase a se ha dejado el módulo de 230V y el ángulo de 0° que es el que está por defecto, en cambio para las fases b y c se ha decidido que el valor del módulo de estas 2 fases fuese diferente y menor a 230V y que su fase no presentase un desfaseamiento de 120° que sería en el caso de un sistema equilibrado.

Fase	Módulo RMS	Ángulo [°]
a	230	0
b	210	-150
c	190	150

Figura 19: Generación de la onda desequilibrada

Podemos ver la representación gráfica de esta onda en la figura siguiente.

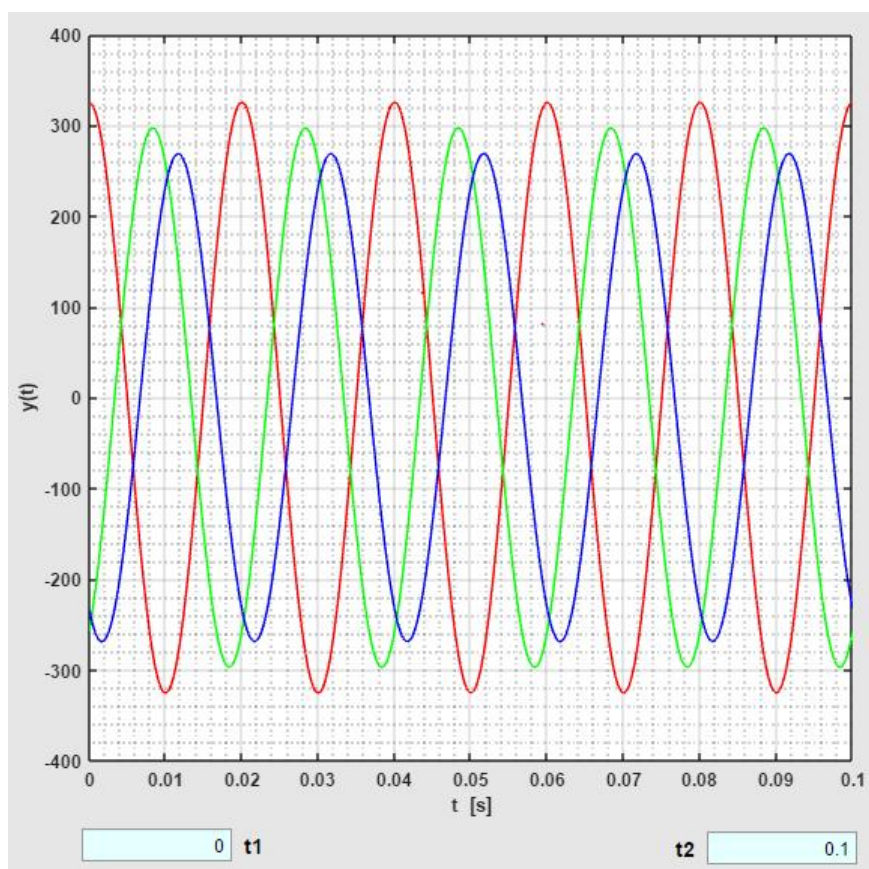


Figura 20: Representación de un sistema trifásico desequilibrado

7. Estudio económico

El trabajo realizado se divide en dos partes, la parte teórica que sería la investigación de las perturbaciones eléctricas y la parte práctica, que sería su representación mediante el aplicativo.

La parte teórica se divide en 6 apartados. Los apartados que más trabajo han supuesto son el apartado 4 que corresponde al suministro eléctrico y se ha realizado en 30 horas, el apartado 5, llamado Norma UNE-EN-50160 que se ha realizado en 40 horas y el apartado 6 llamado Perturbaciones eléctricas realizado en 40 horas. Los demás apartados teóricos han supuesto un trabajo de 5 horas de duración en conjunto.

La parte práctica ha supuesto un trabajo de 30 horas de duración.

La suma de las horas dedicadas al trabajo es de 140 horas.

Un estudiante en prácticas de la ETSEIB recibe 8 €/hora según el convenio de prácticas de la ETSEIB, por lo que para la realización de este trabajo final de grado se estima que el precio total sería aproximadamente 1120 €.

8. Conclusiones

El trabajo estudia la norma UNE-EN-5160 con el objeto de proporcionar una guía para entender el concepto de calidad del suministro eléctrico, los principales parámetros relacionados con dicha calidad y las perturbaciones que pueden alterarla. En este sentido, se ha mostrado como la Norma UNE-EN-50160 por si sola no es suficiente para poder explicar a un público general la calidad del suministro eléctrico y como este trabajo es un apoyo para poder llegar a comprender todas las perturbaciones y como afectan al estudio de la calidad.

Se ha estudiado en primer lugar como se genera, transporta y distribuye el suministro eléctrico, también como se parametriza el suministro eléctrico y finalmente como unas perturbaciones pueden afectar las características óptimas de este suministro eléctrico.

Por último, se ha utilizado una aplicación previamente realizada en un anterior TFG para estudiar y representar las perturbaciones explicadas con el objeto de fijar y clarificar los conceptos teóricos sobre la calidad del suministro eléctrico y las perturbaciones que pueden afectarla.

Además, gracias al trabajo desarrollado en este TFG se han ampliado los conocimientos adquiridos durante el grado a los conceptos sobre calidad del suministro eléctrico los cuales son de gran importancia en las instalaciones eléctricas.

9. Agradecimientos

Para poder haber realizado este trabajo final de grado con éxito, ha sido necesario el apoyo y ayuda de muchas personas.

En primer lugar, quisiera mostrar mi más sincero agradecimiento a mi tutor Luis Sainz Sopera por sus consejos y enseñanzas durante la elaboración del trabajo. Sin sus correcciones y su continuo seguimiento este trabajo no podría haberse llevado a cabo.

En segundo lugar, me gustaría agradecer a mis padres, por haber sido una fuente incondicional de apoyo y ánimos durante no solo la realización del trabajo sino también durante todo el grado.

Finalmente agradecer a mis compañeros de universidad, todos los que durante estos años hemos ido sobrepasando obstáculos hasta llegar al fin de nuestra etapa del grado. Empezamos siendo compañeros de Universidad y acabamos superando los altibajos de la carrera siendo amigos.

10. Bibliografia

- [1] Norma UNE-EN 50160. Características de la tensión suministrada por las redes de distribución. Madrid de 2001
- [2] PEDRA DURÁN, JOAQUÍN, *Circuitos monofásicos y trifásicos*, Edicions UPC, Barcelona, 1999.
- [3] BOIX ARAGONÈS, ORIOL, RULL DURAN, JOAN, *Circuits elèctrics*, Edicions UPC, 2001.
- [4] PRAT, LL., BRAGÓN, R., CHÁVEZ, JA., FERNÁNDEZ, M., JIMÉNEZ, V., MADRENAS, J., NAVARRO, E., SALAZAR, J., *Circuits i dispositius electrònics, Fonaments d'electrònica*, Edicions UPC.
[<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.3/36163/9788498800487.pdf>]
- [7] ORIOL CASANOVAS, JOSEP M^a, *Desenvolupament d'una aplicació informàtica per a l'estudi de conceptes d'electrotècnia*, Barcelona, Desembre 2005.
[<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/2895/50472-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>] [Juliol 2019]
- [8] PLADEVALL GELONCH, PAU, *Desenvolupament d'una aplicació amb MATLAB per l'avaluació d'algoritmes MPPT*, Barcelona, Octubre 2017.
[<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/113162/Desenvolupament%20d%27una%20aplicació%20amb%20Matlab%20per%20l%27avaluació%20d%27algoritmes%20MPPT.pdf?sequence=1&isAllowed=y>] [Juliol 2019]
- [9] SAUQUÉ GÁZQUEZ, SERGIO, *Trabajo final de grado, App Matlab para el Estudio de la Calidad de las Ondas Eléctricas*, Barcelona, Junio 2019.